

AVO/AVA 反演对非均质储层横向分辨率影响

唐志远, 孙赞东, 张远银

中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心, 北京 102249

摘要 塔里木盆地碳酸盐岩储层以次生溶蚀孔洞为主要储集空间, 表现为强非均质性的特点。孔洞体积的准确计算对油田开发方案制定意义重大。受地表沙漠化和储层深埋藏的影响, 塔中地区地震资料具有低信噪比和分辨率的特点。适合于对该地区储层描述以及孔隙流体探测的叠前地震反演方法通常为角道集部分叠加的 AVA 反演。与单道 AVO 反演相比, AVA 反演基于角道集的叠加, 在提高信噪比的同时将影响反演结果的横向分辨率。本文通过物理模拟的办法, 建立了不同大小、低速介质充填的孔洞物理模型。在采集的地震资料基础上, 量化分析了 AVO 反演与 AVA 反演两种不同叠前地震反演方法对同一孔洞的反演结果在非均质储层横向分辨率上的差异, 并且与孔洞实际尺寸进行了对比。结果表明, 地震道集的叠加在提高信噪比的同时降低了横向分辨率, 地震道集叠加后一道所代表的范围越大, 横向分辨率降低越明显。

关键词 AVO 反演; AVA 反演; 孔洞物理模型; 储层非均质性; 横向分辨率

中图分类号 TE122.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.25.005

Impact of AVO/AVA Inversion on the Lateral Resolution of Heterogeneity

TANG Zhiyuan, SUN Zandong, ZHANG Yuanyin

Geophysics Comprehensive Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Carbonate reservoir is widely developed in the Tarim Basin of China, where a large number of oil fields are discovered. The reservoir storage spaces in the area are mostly secondary dissolution caves and are characterized as strong heterogeneity. One of the key technical problems is how to accurately calculate the volume of these caves. Influenced by desertification surface and deeply buried reservoir, the seismic data collected from the area has the obvious characters of low signal-to-noise ratio and low resolution. The pre-stack seismic inversion often used in here is AVA inversion using partially stacked data to characterize the carbonate reservoir. Comparing with AVO inversion using single trace, AVA inversion suffers from the loss of lateral resolution when characterizing heterogeneity. Considering the question mentioned above, a physical model is used to analyze the influence of AVO/AVA inversion on heterogeneity. On the one hand, the differences in the lateral resolution of AVO/AVA inversion are quantitatively studied. On the other hand, the results of seismic inversion are compared with the actual size of caves in the physical model. The results demonstrate that the signal-to-noise ratio is able to be improved by AVA inversion while the lateral resolution is subsequently reduced. For the AVA inversion, seismic incident angle gather is divided into three parts, using for pre-stack inversion, the reservoir heterogeneity resolution is able to be reduced up to 33%.

Keywords AVO inversion; AVA inversion; caved physical modeling; heterogeneity; lateral resolution

0 引言

塔里木盆地碳酸盐岩储层以次生溶蚀孔洞为主要储集空间, 具有强非均质性特征^[1]。受储层埋深和地表沙漠化等条件限制, 碳酸盐岩储层段地震资料具有低信噪比和分辨率的

特点。为了压制噪音, Connolly^[2]于 1999 年最先提出利用叠前弹性反演方法对储层进行识别和预测。碳酸盐岩溶洞型储层的综合探测问题已进行大量研究。其中, 2008 年, 张宏等^[3]从偏移地震剖面出发, 论述了可分辨的溶蚀孔洞型储层地震响

收稿日期: 2012-04-09; 修回日期: 2012-07-27

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)项目(2011CB2011103); 国家科技重大专项(2011ZX05004003)

作者简介: 唐志远, 博士研究生, 研究方向为叠前反演与储层预测, 电子信箱: mmg00@163.com

应表现为“串珠状”强反射特征;彭真明等^[4]利用叠前弹性反演方法与岩石物理相结合,对储层及流体进行预测。2011年,Zhang等^[5]利用叠前弹性反演方法将塔中地区碳酸盐岩储层分为几种不同类型。2012年,Tang等^[6]从物理模型出发,分析论述了孔洞大小以及流体填充差异引起的叠前反演结果差异。然而,这些研究对叠前弹性反演本身由于道集叠加引起的储层非均质性横向分辨率的降低并没有量化分析。在物理模拟方面,2009年,季敏等^[7]通过建立不同形态的孔洞物理模型研究了非均质储层的地震响应特征,但未利用地震反演的方法识别储层和对非均质储层的横向分辨率进行分析。2010年,陈蕾等^[8]从数值模型和物理模型两方面综合研究溶蚀孔洞的可探测性,但也没有考虑非均质储层横向分辨率的问题。

本文采用物理模拟方法,建立了一个高速围岩背景下充填低速介质的孔洞物理模型。在物理模型实验数据的基础上,量化分析了单道AVO(Amplitude Versus Offset,振幅随炮检距变化)反演和角道集部分叠加的AVA(Amplitude Versus incidence Angle,振幅随入射角变化)反演对同一孔洞反演结果的横向分辨率差异,证实了非均质储层横向分辨率与道集叠加有关,为叠前反演对非均质储层描述问题提供了实验依据。

1 物理模型及观测系统介绍

孔洞地震物理模型的制作以及地震资料采集由中国石油天然气集团公司物探重点实验室完成。物理模型设计为上、中、下3个水平层。孔洞置中间层,围岩速度2610m/s,上覆层速度2326m/s,下覆层速度2206m/s。模型包含5个孔洞,直径分别为10,20,30,40,60m,按直径从小到大分别命名为1号,2号, ..., 5号洞。洞内填充物为一种低速材料,速度1426m/s。模型置于水槽中,水层速度1490m/s,模型与实际地质构造尺度比为1:10000。图1给出了物理模型的水槽地震采集示意图。

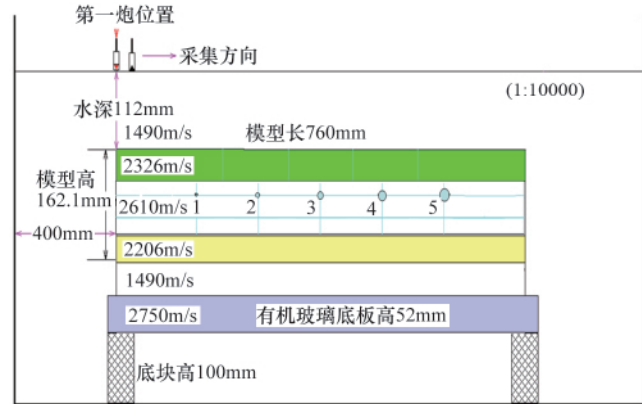


图1 孔洞物理模型的水槽地震采集示意

Fig. 1 Schematic of seismic data collection and physical model parameters

地震资料采集由水槽测试系统完成。将制作好的物理模型放置在水槽中,同时将震源激发和接收探头放入水槽中。震源激发探头发出的超声波在水中传播,遇到物理模型将产生一系列地震波,这些地震波传播到水面附近时被接收探头接收并记录。这种采集方法与海上地震勘探类似,地震采集系统设计为二维单边观测,测线布置在洞的正上方与洞的走向垂直,地震采集参数如表1所示。地震采集所选用激发换能器探头主频为300kHz。

表1 孔洞物理模型地震采集参数

Table 1 Seismic acquisition parameters of caved physical model

炮间距	检波点间距	最小偏移距	最大偏移距	采样间隔	记录时间	满覆盖次数	总炮数	目标层深度
40m	20m	160m	2060m	1ms	5s	24	166	1800m

图2为采集的原始炮集与去噪处理后的炮集对比。分析发现原始炮集反射层界面清晰,噪音成分主要为多次波、线

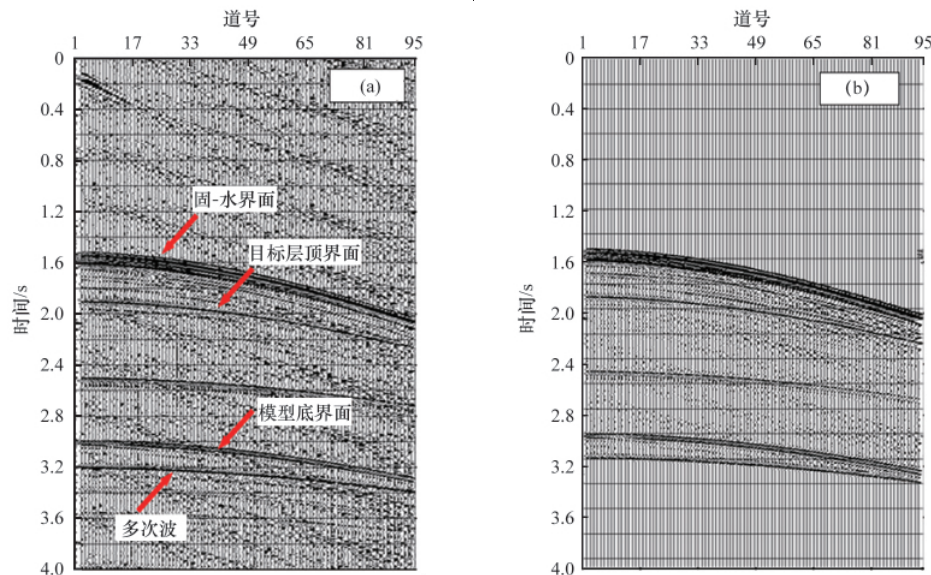


图2 去噪前(a)和去噪后(b)的单炮地震记录对比

Fig. 2 Comparison of seismic shot gathers before and after noise suppression

性干扰和低频噪音。其中,多次波在一次反射之下,处理时可以不考虑;针对线性干扰,采用连续小波变换进行去噪处理,将信号从时间域变换到频率域中,采用分频去噪的办法,针对地震记录中的有效信号与噪声在各个频带表现出的不同特点进行去噪处理。对高频分量选取较窄的时窗,对低频分量选取较宽的时窗,从而既可以较好地去除随机噪声,又可以基本不损失有效信号。

2 AVO/AVA 反演对非均质储层横向分辨率的影响

在二维 Kirchhoff 叠前时间偏移的基础上得到偏移距道

集,通过射线追踪的方法得到入射角道集,在反演方法上采用基于 Aki-Richard 近似的约束稀疏脉冲方法进行叠前反演^[9]。对 AVO 反演,输入的层速度模型为物理模型的真实速度,所选用的地震资料为等偏移距间距抽取的 8 个单一偏移距道集;对 AVA 反演,受储层段资料的噪音和地震资料缺失等问题限制,此次反演选取有效资料的入射角范围为 6°—35°,均分为 6°—15°,16°—25°,26°—35° 3 个部分叠加道集。

2.1 定性分析

图 3 为 AVO 反演所选用的偏移距道集地震剖面。图 4 为 AVA 反演所选用的角道集部分叠加地震剖面。对比分析发

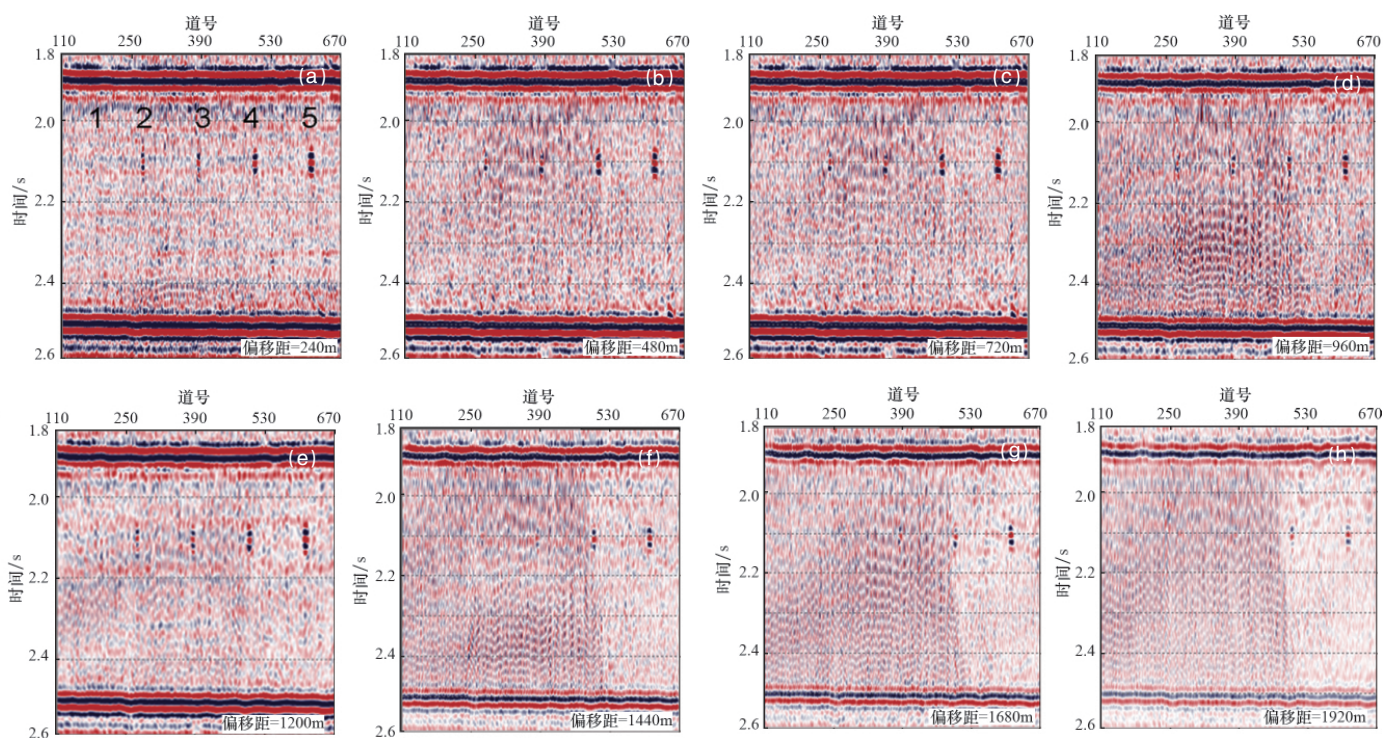


图 3 AVO 反演选用的 8 个单一偏移距剖面(数字 1—5 分别为 5 个孔洞)

Fig. 3 Eight single offset gathers prepared for AVO inversion
(Number 1—5 denotes the five caves, respectively. Offset is marked on the top of each figure)

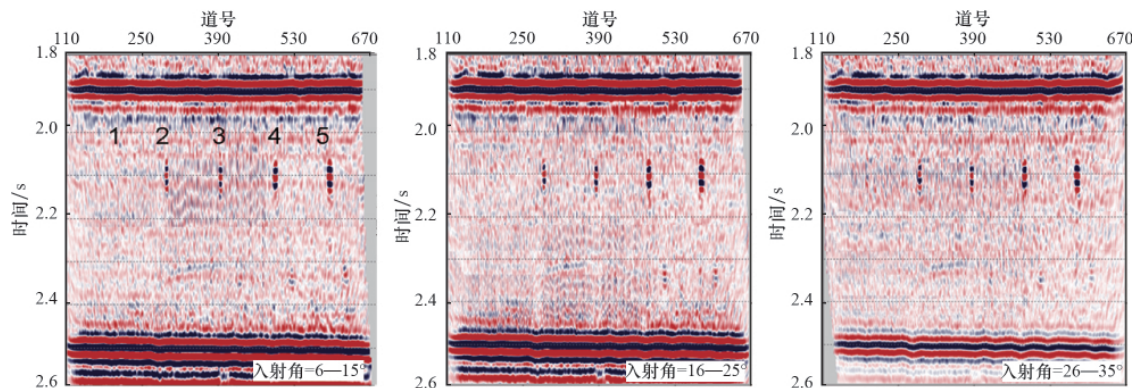


图 4 AVA 反演选用的 3 个角道集部分叠加剖面

Fig. 4 Display of three partially stacked incidence angle gathers prepared for AVA inversion

现, 溶洞在两图中都可以识别, AVO 单道记录中噪音明显高于 AVA 叠加剖面。图 5 为孔洞物理模型 AVA 反演与 AVO 反演的结果对比, 图中 PI 为纵波阻抗反演结果, SI 为横波阻抗反演结果。通过对比可以发现, AVO 与 AVA 的反演结果基本

相似, 溶洞在两图中都可以识别。两者反演结果经进一步对比发现, 在低噪音水平上, AVO 反演略高于 AVA 反演; 在溶洞规模上, AVO 反演比 AVA 反演小, 溶洞内阻抗值降低也没有 AVA 反演结果明显。

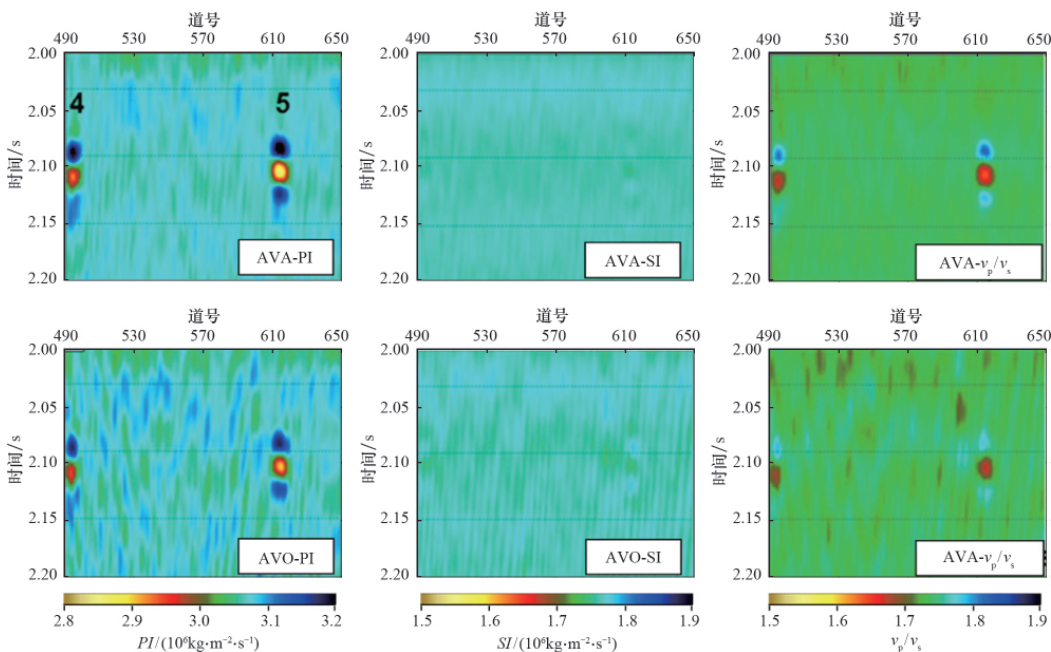


图 5 AVO/AVA 反演效果对比

Fig. 5 Inverted results for cave 4 and cave 5

上述事例证实了道集的叠加在改善信噪比的同时对储层非均质性横向分辨率存在影响。为进一步分析, 进行了以下尝试: (1) 一定程度上提高 AVO 反演的信噪比又不至于严重影响横向分辨率, 对 AVO 偏移距道集采用临近两道叠加方法, 还是按之前的等偏移距间隔抽取 8 道, 得到 AVO 叠加资料; (2) 对入射角道集采用平均分 5 部分叠加方法得到

AVA 部分叠加资料 (入射角道集分为 $6^{\circ}-11^{\circ}$, $12^{\circ}-17^{\circ}$, $18^{\circ}-23^{\circ}$, $24^{\circ}-29^{\circ}$, $30^{\circ}-35^{\circ}$ 5 个部分)。这样就可以得到 4 个叠前资料——AVO 单道、AVO 叠加、AVA 分 5 部分叠加和 AVA 分 3 部分叠加, 用于验证道集的不同叠加方式对储层非均质性横向分辨率的影响。

图 6 为分别上述 4 类叠前资料的反演结果以 5 号洞为

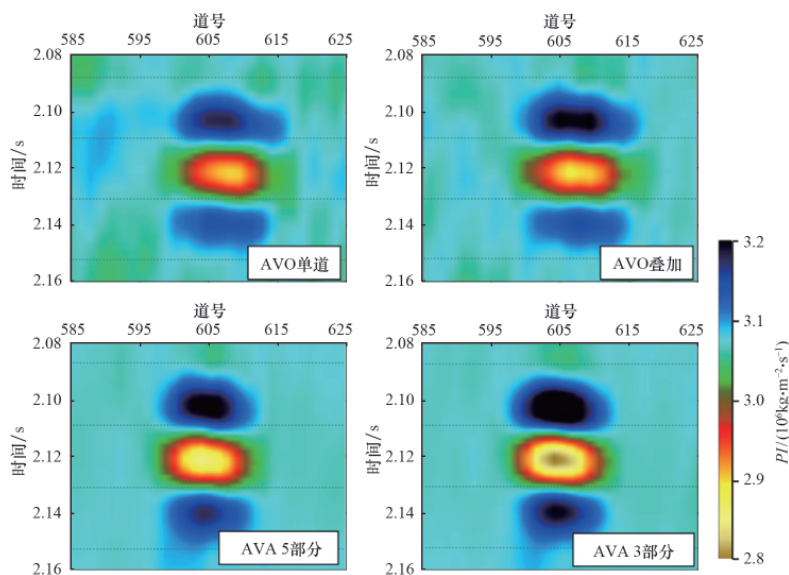


图 6 4 类地震资料叠前反演结果的纵波阻抗分布对比 (以 5 号洞为例)

Fig. 6 Four kinds of pre-stack seismic inversion result of impedance distribution for cave 5

例的对比分析,进一步证实了道集部分叠加后单道所代表的范围越大,反演的孔洞越大,孔洞内阻抗与围岩阻抗相比降低也越明显,并且信噪比改善越明显。AVO单道与AVO叠加反演结果对比发现,仅仅由于临近两道的叠加,剖面上显示的孔洞有明显向两侧延伸的趋势,洞内阻抗与围岩的差距也更大。AVA分3部分与分5部分叠加的反演结果相比,二者在孔洞尺寸上差异较小,但是洞内阻抗与围岩差距分3部分的明显大于分5部分叠加。

2.2 定量分析

AVO反演没有经过道集叠加而具有更高分辨率,因此反演结果最接近孔洞真实大小。图7为AVO反演结果穿过5号洞中心位置时刻提取的含孔洞及两侧一定范围的阻抗值分布图。考虑到野外实际资料情况下,不可能预先得知地下孔洞介质的真实速度,一般用储层背景速度对整个地震资料进行偏移处理。为模拟实际,模型资料选用的偏移速度也设置为背景速度。从图7可以看出,受此因素影响,反演结果中孔洞阻抗值与实际值 $1.67 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 相比还是有很大的误差,并且反演得到的纵波阻抗数据降低为平缓下降,孔洞边界难以确定。

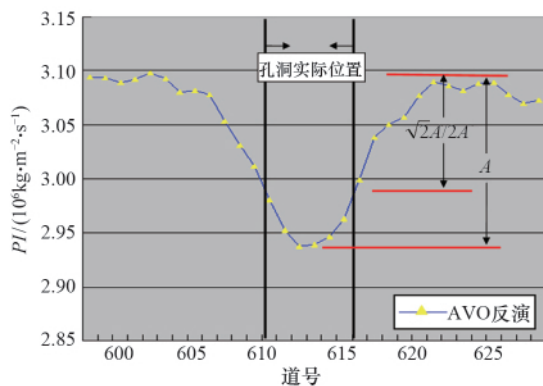


图7 AVO反演结果纵波阻抗值分布与真实值的比较(以5号洞为例)

Fig. 7 Inverted P-impedance distribution using AVO inversion compared with the actual diameters for cave 5

通过与物理模型孔洞实际位置的比较发现,阻抗开始降低的点并不是孔洞的边界,只有阻抗值在某个值以下才能计算为储层。以5号洞为例,实际孔洞边界与反演结果的交点在洞中心最低阻抗与围岩差距值(幅度值定义为A)的约0.7倍处,这与物理上计算能谱的值 $\sqrt{2}/2$ 非常接近,因此,本文考虑将反演结果孔洞边界定义为围岩阻抗与孔洞中心最低值差距的 $\sqrt{2}/2$ 处。

以直径为60m的5号孔洞为研究对象,图8为在上述4类叠前资料的纵波阻抗反演结果上提取横向过孔洞中心的阻抗值分布。图9为上述4个不同资料反演得到的孔洞直径与实际模型的孔洞直径的比值关系。从图中可以看出,道集

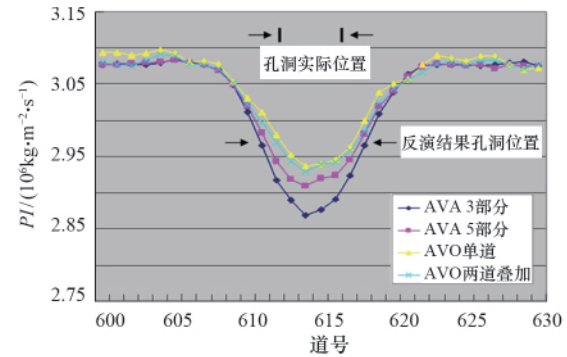


图8 道集的不同叠加方法对反演结果纵波阻抗分布的影响(以5号洞为例)

Fig. 8 Inverted P-impedance under four different cases for cave 5

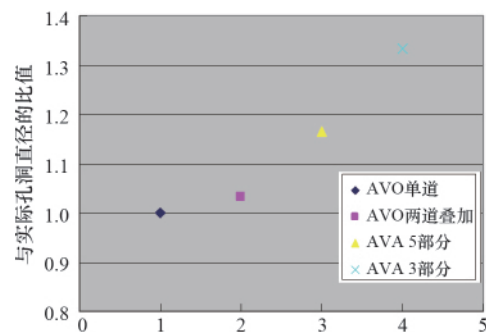


图9 道集的不同叠加方法对反演结果的影响(以5号洞为例)

Fig. 9 Cave diameters of inversion results compared with the actual diameter for cave 5

叠加后一道所代表的范围越大,反演的误差越大。对入射角道集分3部分叠加的AVA反演来说,横向分辨率误差可以达到33%;而入射角道集分5部分叠加的AVA反演横向分辨率误差约为17%;相对于单道AVO反演,临近两道叠加的AVO叠加资料反演产生的横向分辨率误差约为4%。

3 结论

本文在孔洞物理模型分别抽取AVO单道、AVO临近两道叠加、AVA入射角道集分3部分和5部分叠加资料基础上分别反演,通过反演结果上孔洞大小的对比,得到以下结论:

(1) 地震道集叠加在提高信噪比的同时也降低了储层非均质性的横向分辨率。

(2) 地震道集叠加后,单道所代表的的叠加范围越大,分辨率的降低也更明显。对入射角道集分3部分叠加资料的AVA反演,储层非均质性的横向分辨率的降低可达33%。

致谢 感谢CNPC物探重点实验室提供物理模型数据。

参考文献 (References)

[1] 王光付. 碳酸盐岩溶洞型储层综合识别及预测方法 [J]. 石油学报

- 2008, 29(1): 47-51.
Wang Guangfu. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 47-51.
- [2] Connolly P. Elastic impedance[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(4): 412-438.
- [3] 张宏, 郑浚茂, 杨道庆, 等. 塔中卡塔克区块古岩溶储层地震预测技术[J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 69-74.
Zhang Hong, Zheng Junmao, Yang Daoqing, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(1): 69-74.
- [4] 彭真明, 李亚林, 巫盛洪, 等. 碳酸盐岩储层多角度弹性阻抗流体识别方法[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 881-885.
Peng Zhenming, Li Yalin, Wu Shenghong, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 881-885.
- [5] Zhang Y Y, Sun Z D, Yang H J, et al. Pre-stack inversion for caved carbonate reservoir prediction: A case study from Tarim Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2011, 8(4): 415-421.
- [6] Tang Z Y, Sun Z D, Wei J X. Karsts-caved carbonate reservoir heterogeneity study by AVO/AVA inversion using a physical modeling data [C]. 74th EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2012, Copenhagen, Denmark, June 4-7, 2012.
- [7] 季敏, 魏建新, 王尚旭. 孔洞物理模型数据的地震响应特征分析[J]. *石油地球物理勘探*, 2009, 44(2): 196-200.
Ji Min, Wei Jianxin, Wang Shangxu. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(2): 196-200.
- [8] 陈蕾, 孙赞东, 魏建新, 等. 从数值模型和物理模型研究溶蚀孔洞的可探测性 [C]//地质地球物理综合研究中心第三届技术年会论文集. 北京: 中国石油大学(北京)地质地球物理综合研究中心, 2010: 261-270.
Chen Lei, Sun Zandong, Wei Jianxin, et al. Study on the detectability of dissolution cave using numerical and physical models[C]//Proceedings of 3rd Technical Annual Meeting for Laboratory for Integration of Geology and Geophysics. Beijing: Laboratory for Integration of Geology and Geophysics, China University of Petroleum, Beijing, 2010: 261-270.
- [9] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology: Theory and methods[M]. San Francisco, CA: W H Freeman and Co., 1980.

(责任编辑 朱宇)

欢迎订阅 欢迎赐稿

中国科技资源导刊 (双月刊)

《中国科技资源导刊》是中国科学技术信息研究所、南京大学主办的科技管理类专业性期刊。办刊宗旨是宣传和探讨科技资源管理的战略政策, 探索和揭示科技资源管理领域的基本原理和规律, 展示技术创新实践经验等, 促进我国科技资源管理领域的理论研究与实践管理水平的不断提升, 为科技资源管理者和研究者提供高水平的学术交流平台。主要栏目包括热点分析、专题研究、理论研究、实践探讨、信息动态等。

重点关注的热点是科技资源优化配置与高效利用、科技资源开放共享模式与策略、科技信息资源开发与综合利用、科技数据管理与应用、创新型科技人才开发与管理、科学仪器设备自主创新、科技项目和成果的管理与应用、科技资源质量保障机制研究、知识资源的组织与管理、科研诚信研究等。

本刊为双月刊, 大 16 开 112 页。刊号: CN11-5649/F。每期定价: 5 元, 全年: 90 元。欲订阅者请与编辑部联系。

通讯地址: (100045)北京市西城区三里河路 54 号《中国科技资源导刊》编辑部

电 话: 010-68514086/68571416

联系人: 莫 妍

E-mail: zgkjzydk@istic.ac.cn

网 址: <http://www.zgkjzydk.com.cn>




科技
导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目发表图书评论文章, 被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主, 兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容。欢迎投稿, 择优刊登。每篇书评以 2100 字左右为宜, 需配书影, 并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑: 陈广仁, 投稿邮箱: chenguangren@cast.org.cn。